



## Beschreibung

### TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung bezieht sich auf einen an den Enden kurzgeschlossenen Wicklungsstab von Wechselstrommaschinen mit erweitertem Feldausgleich gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Die Erfindung nimmt dabei Bezug auf einen Stand der Technik, wie er sich beispielsweise aus der DE-PS 14 88 769 ergibt.

### TECHNOLOGISCHER HINTERGRUND UND STAND DER TECHNIK

Statorwicklungsstäbe von grossen Wechselstrommaschinen bestehen regelmässig aus einer Vielzahl von gegeneinander isolierten und nach dem Roebel-Prinzip untereinander verdrehten Teileiter, die an beiden Stabenden kurzgeschlossen sind (vgl. Sequenz "Herstellung der Wicklungen elektrischer Maschinen", Springer-Verlag Wien, New York, 1973, Seiten 69 - 83, insbesondere Abb 19 auf Seite 79).

Der klassische Roebelstab weist eine 360°-Verdrillung im Nutteil auf. In den Stirnbügeln sind die Teileiter parallel, also unverdrillt, geführt. Man hat aber sehr bald erkannt, dass auch ausserhalb der Nut die Stäbe von Wechselfeldern erfasst werden, welche die Stirnbügel von der Breitseite (Querkomponenten) wie von der Schmalseite (Radialkomponenten) durchsetzen.

Um unerwünschten Zusatzverlusten durch das Stirnfeld des Stators vorzubeugen, sind die Stirnbügel in gegeneinander isolierte Teileiter unterteilt. Doch entstehen dabei immer noch Verluste durch sogenannte Schlingströme, die sich über die Verbindungshülse an den Stabenden schliessen. Aus diesem Grund wurden eine Reihe von Sonderverdrillungen vorgeschlagen, die sich sowohl auf den Nut- oder Aktivteil des Stabes, als auch auf seinen Stirnbügelteil beziehen. G. Neidhöfer gibt in dem benannten Buch von Sequenz im Abschnitt 3.3 "Roebelstäbe mit erweitertem Feldausgleich" einen nahezu vollständigen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten, den erweiterten Feldausgleich zu erreichen und damit grössere Temperaturdifferenzen und damit lokale Überhitzungen innerhalb des Stabes zu eliminieren. Eine besonders wirtschaftliche Lösung ist dabei die 90°/360°/90°-Verdrillung, d.h. die Teileiter in beiden Stirnbügeln sind um jeweils 90°, die Teileiter im Aktivteil sind um 360° verdreht (vgl. Sequenz a.a.O. Abb.24 auf Seite 74, oder DE-PS 14 88 769).

Weil bei Maschinen mit kurzer Aktivteillänge, z.B. Hydro-Generatoren, infolge der Verroebelung in den Stirnbügeln die Gesamtlänge der Maschine grösser wird, und die Abstützung der weitausladenden Stirnbügel sehr aufwendig ist, wird im Konferenzbericht ISSM-93 "Proceedings of the International Symposium on Sali-ent-Pole Machines", 10. - 12. Oktober 1993, WUHAN, China, , Seite 384 - 389, im Beitrag von Xu Shanchun

et al. "A New Transposition Technique of Stator Bars of The Hydrogenerator" ein neuartiger Weg zum erweiterten Feldausgleich vorgeschlagen, nämlich eine sogenannte Unterverroebelung ("non-360° transposition" oder "incomplete transposition") oder eine sogenannte Leerlänge ("transposition with a void") im Aktivteil in Kombination mit nichtverdrehten Stirnbügelteilen. Jeder der beiden "Sonderverdrillungen" erreicht eine merkliche Verkleinerung der Schlingströme, und sie sollen nach Aussagen des Konferenzberichts die Temperaturdifferenzen innerhalb des Stabes stark verkleinern.

### KURZE DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Ausgehend vom geschilderten Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, einen verroebelten Statorwicklungsstab mit erweitertem Feldausgleich zu schaffen, der eine noch weitergehende Unterdrückung der Schlingströme und damit Abflachung des Temperaturprofils im Leiterstab ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss dadurch gelöst, dass die Teileiter im Stirnbügelteil eine Verdrillung zwischen 60° und 120° aufweisen, und im Aktivteilabschnitt eine Unterverroebelung vorgesehen ist, d.h. die Verdrillung im Aktivteilabschnitt gleichmässig und kleiner als 360° ist, oder bei vollständiger 360°-Verdrillung im Aktivteilabschnitt in Aktivteilmittelpunkt eine Leerlänge, d. h. ein unverdrillter Abschnitt, vorgesehen ist, während die Verdrillung im Aktivteil ausserhalb dieses unverdrillten Abschnitts eine gleichmässige 180°-Verroebelung.

Die gemeinsame Anwendungen der Teilehren nach der DE-PS 14 88 769 (Sonderverroebelung mit 90°/360°/90°-Verdrillung) und einer Unterverroebelung/Leerlänge im Aktivteil nach XU Shanchun et al. a.a.O. führt zu einem Leiterstab, der eine nicht ohne weiteres vorhersehbare praktisch vollständige Unterdrückung der Schlingströme ermöglicht und damit eine nochmalige Abflachung des Temperaturprofils im Leiterstab erzielt wird.

Die Erfindung lässt sich bei allen mittleren und grossen elektrischen Maschinen wie Turbogeneratoren oder Hydrogeneratoren einsetzen.

Nachstehend werden anhand der Zeichnung die Erfindung und die ihr zugrundeliegenden Überlegungen anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert.

### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

In der Zeichnung zeigt:

- Fig.1 eine schematische Draufsicht auf einen bekannten Roebelstab mit erweitertem Feldausgleich mit 90°/360°/90°-Verdrillung;
- Fig-2 Diagramme von Roebelstäben mit verschiedenen Verdrillungen zur Verdeutlichung der Wirkung des Eigenfeldes, und zwar für einen Roebelstab mit der bekannten 90°-360°-90°-Ver-

roebelung (Fig.2a), einen Roebelstab mit Leerlänge (Fig.2b) und einen Roebelstab mit Unterveroebelung (Fig.2c);

Fig.3 Diagramme von Roebelstäben mit verschiedenen Verdrehungen zur Verdeutlichung der Wirkung des Fremdfeldes, und zwar für einen Roebelstab mit der bekannten  $90^\circ$ - $360^\circ$ - $90^\circ$ -Verroebelung (Fig.3a), einen Roebelstab mit Leerlänge (Fig.3b) und einen Roebelstab mit Unterveroebelung (Fig.3c);

Fig.4 eine schematische Darstellung der Hälfte eines unterverroebelten Stabes mit fünf Teilleitern pro Säule mit  $324^\circ$ -Verdrillung.

### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Der Roebelstab nach Fig.1 besteht aus gegeneinander elektrische isolierten Teilleitern 1, die an den Enden durch Oesen 2, 3 elektrisch und mechanisch miteinander verbunden sind. Er besteht aus zwei Stirnbügelabschnitten 4, 5 im linken und rechten Wickelkopf und einem Aktivteilabschnitt 6. Letzterer liegt vollständig in (nicht dargestellten) Nuten im Statorblechlörper 7 (Aktivteil) der elektrischen Maschine. Die beiden Stirnbügelteile 4,5 sind um jeweils  $90^\circ$  verroebelt, der Aktivteil 6 ist um  $360^\circ$  verroebelt.

Das schematische Diagramm gemäss Fig.2a bzw. 3a für den Roebelstab mit  $90^\circ/360^\circ/90^\circ$ -Verdrillung nach Fig.1 zeigt der Verlauf der im Beispielsfall fünf Teilleiter a bis f bzw. g bis 1 pro Teilleitersäule im linken Stirnbügel 4, im Aktivteil 6 und im rechten Stirnbügel 5. Man erkennt deutlich, wie die einzelnen Teilleiter im Aktivteil 6 in der Nut jede Position einnehmen (=  $360^\circ$ -Verdrillung), während sie in den Stirnbügeln  $90^\circ$  verdrillt sind. Der Teilleiter d in beiden Stirnbügeln 4, 5 zusammengekommen am längsten gegen den Rotor R hin positioniert. Die anderen Teilleiter sind weniger lang gegen den Rotor R hin positioniert. Wie aus der bekannten Wirkung des elektromagnetischen Feldes auf den Stirnbügelteil eines unverroebelten Stabes hervorgeht, ist der Teilleiter d mit am meisten Strom belastet, die restlichen sukzessive mit weniger. Für das Verständnis der Erfindung genügt es festzuhalten, dass bei einer  $90^\circ$ - $360^\circ$ - $90^\circ$ -Verdrillung das Wickelkopf-Eigenfeld völlig kompensiert ist, während das Wickelkopf-Fremdfeld nur teilweise ausgeglichen werden (vgl. SEQUENZ a.a.O., insbesondere S.74, Abb. 24, und den zugehörigen Text auf Seite 75).

Hier setzt nun die Erfindung ein. Bildet man nun an einem in den Stirnbügeln 4, 5 mit  $90^\circ$  verroebelten Leiterstab den Aktivteilabschnitt 6 mit einer Unterveroebelung, d.h. einer Verroebelung mit weniger als  $360^\circ$ -Verdrillung aus, oder sieht man in Aktivteilmitte eine Leerlänge (=unverroebelter Abschnitt) mit  $360^\circ$ -Verdrillung ausserhalb der Leerlänge vor, so werden diejenigen Teilleiter, die hohe Ströme führen, länger am Nutgrund

belassen. Sie geben dann Strom an diejenigen Teilleiter ab, die näher an der Nutöffnung, also mehr dem Rotor R benachbart sind. Dies sind aber gerade diejenigen Teilleiter, welche weniger Strom führen. Auf diese Weise lässt sich eine nahezu perfekte gleichmässige Stromverteilung im Leiterstab erreichen.

Die beiden Varianten Leerlänge und Unterverroebelung sind in den beiden Diagrammen nach Fig.2b und 3b bzw. Fig.2c und Fig.3c im Vergleich zum bekannten Roebelstab mit  $90^\circ$ - $360^\circ$ - $90^\circ$ -Verroebelung nach Fig.2a und Fig.3a schematisch dargestellt, wobei sich die Fig.2a, 2b und 2c auf die Eigenfeldbetrachtung, Fig.3a, 3b und 3c auf die Fremdfeldbetrachtung beziehen. Die Darstellung lehnt sich dabei an die in der Literatur übliche Darstellungsweise von Roebelstäben an, wie sie z.B. auch in der eingangs genannten DE-PS 14 88 769 verwendet wurde. So symbolisieren die von links oben nach rechts unten verlaufenden durchgehend eingezeichneten Linien Teilleiterbahnen, die sich bei Seitenansicht eines Zweiebenenstabes (Fig.1) auf dessen Vorderseite befinden; unterbrochene-Linien zeigen die Bahnen auf der Rückseite, d.h. in der zweiten Teilleiterebene. Ferner ist in den Figuren 2a bis 2c der jeweilige Feldverlauf  $B_E$  des Eigenfeldes  $B_E$  im Aktivteil und der Eigenfeldes  $B_{WK}$  im Wickelkopf über die Stabhöhe dargestellt. Die Minus- und Pluszeichen im Kreis bedeuten dabei das Vorzeichen der in den Teilflächen der Elementarschleifen induzierten Spannungen unter Berücksichtigung des Umlaufsinn der Flächenkonturen sowie die Richtung des sie durchsetzen Flusses. Die in Fig.2a und 3a mit einem Fragezeichen im Kreis bezeichneten Flächen symbolisieren den nicht ausgeglichenen Teil am nicht verroebelten Uebergang vom Aktivteil 6 zu den Stirnbügeln 4 bzw. 5. In den Figuren 3a bis 3c ist ferner die Lage der im Beispielsfall 12 Teilleiter a bis 1 an den Stäben eingezeichnet.

Bevor die Erfindung näher beschrieben wird, seien folgende Feldbetrachtungen vorangestellt:

Wie bei Stab mit  $90^\circ$ - $360^\circ$ - $90^\circ$ -Verroebelung nach Fig.3a zu erkennen ist, verbleibt bei der Fremdfeldbetrachtung ein Schleifenteil, der nicht kompensiert ist (Fragezeichen im Doppelkreis). Dieser nichtkompensierte Teil erzeugt Schlingströme, welche über die Stabhöhe sinh-förmig (antisymmetrisch) verteilt sind. Ziel der Leerlänge/Unterverroebelung im Aktivteil ist, diesen Rest auszugleichen. Wie später noch näher erläutert wird, gelingt dieser Ausgleich, in dem nun im Aktivteil 6 ein nichtausgeglichener Teil - symbolisiert durch ein Pluszeichen im Doppelkreis - erzeugt wird, der demjenigen im Stirnbügelteil 4 bzw. 5 - symbolisiert durch ein Minuszeichen im Doppelkreis - entgegenwirkt. Dazu ist zu bemerken, dass dieser Mechanismus nur dann funktioniert, wenn das Feld des Wickelkopfes am Ort des Stabes und das Nutfeld im Aktivteil etwa in Phase sind. Dies ist der Fall, da, wie bekannt, im Aktivteil sowie im Stirnbügelteil die Stromverdrängung in die gleiche Richtung (radial nach innen) erfolgt, was auf gleichphasige Felder zurückzuführen ist. Die relativ grossen unausge-

gleichenen Schleifenteile im Wickelkopf können durch relativ kleine Gegenschleifen im Aktivteil kompensiert werden, das das Nutquerfeld bedeutend stärker ist.

Bei der Eigenfeldbetrachtung nach Fig. 2a bis c ist zu erkennen, dass bei Stab mit  $90^\circ$ - $360^\circ$ - $90^\circ$ -Verroebelung die Schleifen vollständig kompensiert sind. Nur eventuell nichtverdrillte Stabteile, z.B. am Aktivteilaustritt, ergeben Restspannungen für Schlingströme. Eine Leerlänge 8 im Aktivteil 6 erzeugt nun Schlingspannungen, welche Schlingströme ergeben, die bezüglich der Stabhöhe cosh-förmig (symmetrisch) verteilt sind. Der Effekt von eventuell nicht verdrillten Stabteilen des Wickelkopfes unmittelbar am Aktivteilaustritt würde verstärkt. Im Gegensatz dazu bewirkt eine Unterverroebelung im Aktivteil das Gegenteil. Die nichtkompensierten Teile im Wickelkopf stehen dem nichtkompensierten Teil im Aktivteil entgegen und löschen sich gegenseitig aus, wobei diese Kompensation eventuell nicht zu 100% erfolgt, das die Unterverroebelung im Aktivteil auf die Kompensation des Wickelkopf-Fremdfeldes ausgerichtet ist. Es kann nun der Eindruck entstehen, dass mit der Erfindung an einem Ort eine Verbesserung erzielt wird (Fremdfeld), und am anderen Ort eine Verschlechterung (Eigenfeld). Dies ist in der Tat der Fall. Betrachtet man jedoch beide Ergebnisse zusammen, so resultiert gesamthaft gesehen eine Verbesserung, insbesondere bei der Unterverroebelung.

Der Leiterstab nach Fig. 2b und Fig. 3b weist in Aktivteilmitte M eine Leerlänge 8 auf, d.h. einen Abschnitt, in welchem die Teilleiter a bis 1 parallel geführt sind. Ausserhalb dieses Bereichs 8 links und rechts der Leerlänge beträgt die Verroebelung jeweils  $180^\circ$ . Die axiale Länge  $l_v$  dieser Leerlänge 8 ist in erster Näherung von der Grösse der Wickelkopfausladung  $l_{WK}$  abhängig. Mit modernen Rechenmethoden lässt sich bei einer konkreten Maschine diese Leerlänge vergleichsweise exakt bestimmen, als Richtwert kann jedoch angegeben werden, dass die Grösse  $l_v$  der Leerlänge 8 zwischen 5 und 10%, maximal 15%, der Ausladung  $l_{WK}$  betragen sollte, um einen praktisch vollkommenen (erweiterten) Feldausgleich im Wickelkopf zu erzielen. Als zweiter Richtwert kann für die Bemessung der Leerlänge 8 bei Turbogeneratoren angegeben werden, dass bis 10% der Aktivteillänge  $l_{Fe}$  betragen kann.

Der Leiterstab nach Fig. 2c und Fig. 3c weist im Aktivteil 6 eine Unterverroebelung, d.h. eine von der üblichen  $360^\circ$ -Verdrillung nach unten abweichende Verdrillung auf. Bei dem in Fig. 4 dargestellten Leiterstab mit jeweils 5 Teilleitern 1 pro Säule, also insgesamt 10 Teilleitern beträgt die Verdrillung  $9/10$  von  $360^\circ$ , also  $324^\circ$ , die Unterverroebelung demgemäss  $36^\circ$ , was gleichzeitig bei einem solchen Stab die minimale Unterverroebelung darstellt.

Reale Roebelstäbe weisen eine weit höhere Anzahl von Teilleitern auf. Diese liegt typisch zwischen 80 und 120 Teilleitern pro Stab. Somit ergibt sich bei einem Stab mit n Teilleitern und  $360^\circ$ -Verdrillung im Aktivteil eine minimale Unterverroebelung von  $U = 360^\circ/n$  in der

Grösse von  $4,5^\circ$  bei 80 Teilleitern und  $3^\circ$  bei 120 Teilleitern pro Leiterstab.

Analog zur Bemessung der Leerlänge ist auch der Grad der Unterverroebelung in erster Näherung abhängig von der Wickelkopfausladung. Je grösser diese Ausladung ist, desto grösser wird auch der Einfluss des Stirnfeldes im Wickelkopf und demgemäss sollte auch der Grad der Unterverroebelung im Aktivteil höher sein. Wie bei der Bemessung der Leerlänge lässt sich auch hier der Grad der Unterverroebelung mit modernen Rechenmethoden bei einer konkreten Maschine vergleichsweise exakt bestimmen, als Richtwert kann jedoch angegeben werden, dass die in Winkelgraden ca.  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  betragen sollte, um einen praktisch vollkommenen (erweiterten) Feldausgleich im Wickelkopf zu erzielen.

In den vorstehenden Darlegungen wurde stets von einer Verdrillung in den Stirnbügeln von  $90^\circ$  ausgegangen. Umfangreiche Berechnungen haben gezeigt, dass auch mit Abweichungen von  $\pm 30^\circ$ , also Verdrillungen von  $60^\circ$  bis  $120^\circ$  in den Stirnbügelabschnitten 4, 5, in Kombination mit Leerlängen oder Unterverroebelung im Aktivteil 6 ein praktisch perfekter Feldausgleich im Wickelkopf zu erzielen ist.

Prinzipiell ist es möglich, Stäbe herzustellen, die bei der angegebenen Verdrillung im Stirnbügelabschnitt neben einer Leerlänge auch eine Unterverroebelung aufweisen. Die Herstellung derartiger Leiterstäbe ist jedoch aufwendig, kann jedoch für Sonderfälle durchaus in Betracht gezogen werden.

#### BEZEICHNUNGSLISTE

1	Teilleiter
2,3	Oesen
4	linker Stirnbügelabschnitt
5	rechter Stirnbügelabschnitt
6	Aktivteilabschnitt
7	Aktivteil (Statorblechkörper)
8	Leerlänge
$l_{Fe}$	Aktivteillänge
$l_{WK}$	Stirnbügel ausladung
$l_v$	Leerlänge
M	Aktivteilmitte
n	Anzahl Teilleiter pro Stab
R	Rotor
a-l	Teilleiterbezeichnungen in den Diagrammen
U	in Winkelgraden gemessene Unterverroebelung

#### Patentansprüche

1. An den Enden kurzgeschlossenen Wicklungsstab von Wechselstrommaschinen mit erweitertem Feldausgleich, welcher Leiterstab aus einer Vielzahl gegeneinander elektrisch isolierter Teilleiter (1) aufgebaut ist, welche Teilleiter nach dem Roebel-Prinzip verdrillt sind, wobei sowohl die Teilleiter in beiden

Stirnbügelabschnitten (4,5) als auch im Aktivteilabschnitt (6) miteinander verdreht sind, dadurch gekennzeichnet, dass die Teileiter (1) in beiden Stirnbügelabschnitten eine Verdrehung zwischen 60° und 120°, vorzugsweise 90°, aufweisen, und im Aktivteilabschnitt (6) eine Unterverdrebelung vorgesehen ist, d.h. die Verdrehung im Aktivteilabschnitt (6) gleichmässig und kleiner als 360° ist, oder bei vollständiger 360°-Verdrehung im Aktivteilabschnitt (6) in Aktivteilmitte (M) eine Leerlänge (8), d.h. ein unverdrehter Abschnitt, vorgesehen ist, während die Verdrehung im Aktivteilabschnitt (6) ausserhalb dieses unverdrehten Abschnitts (8) eine gleichmässige 180°-Verdrebelung ist.

2. Windungsstab nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Leerlänge (8) eine Länge ( $l_v$ ) in der Grössenordnung von etwa 10% der Wickelkopfausladung ( $l_{wk}$ ) aufweist.
3. Windungsstab nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass bei Unterverdrebelung im Aktivteilabschnitt (6) die in Winkelgraden gemessene Unterverdrebelung 10° bis 15° beträgt.

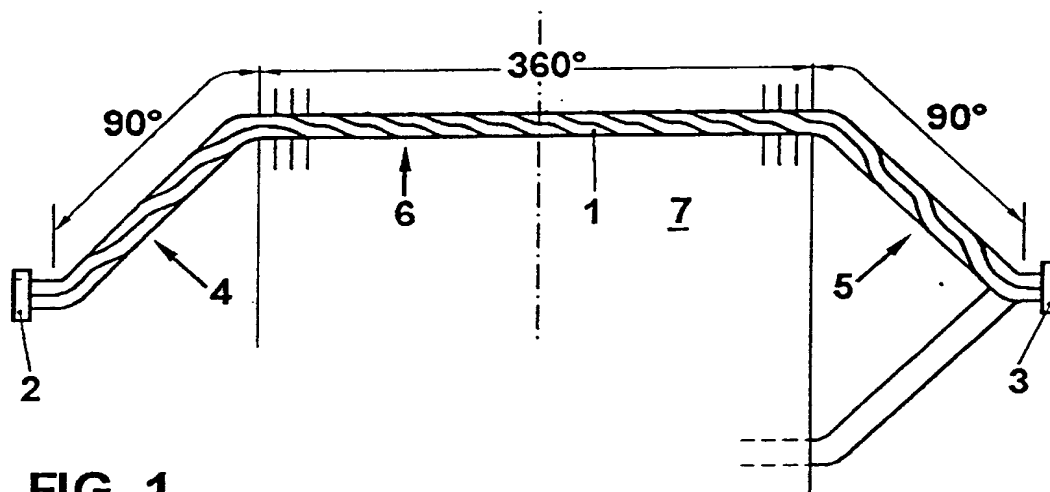


FIG. 1

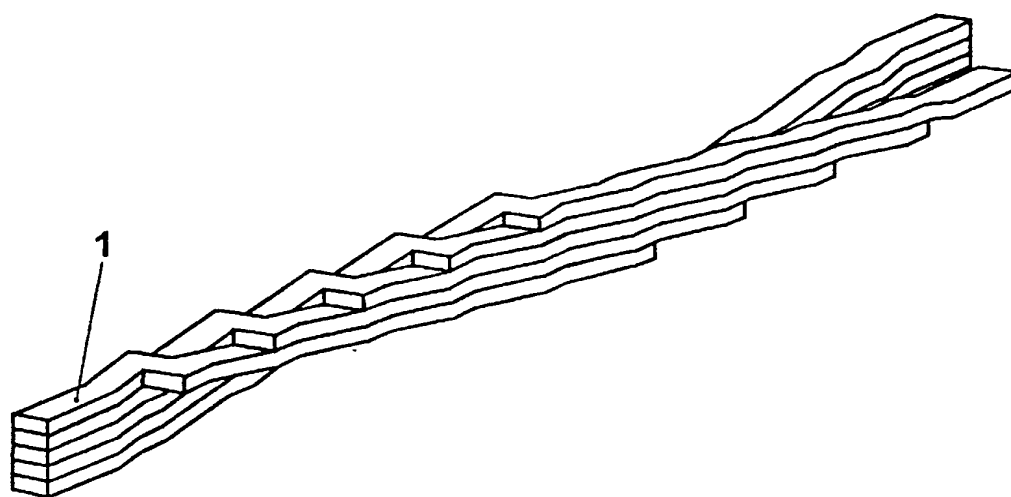
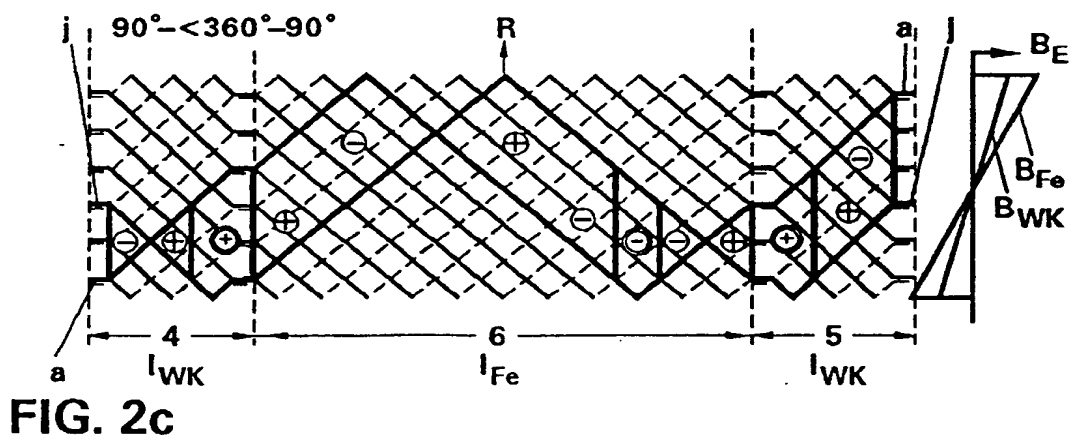
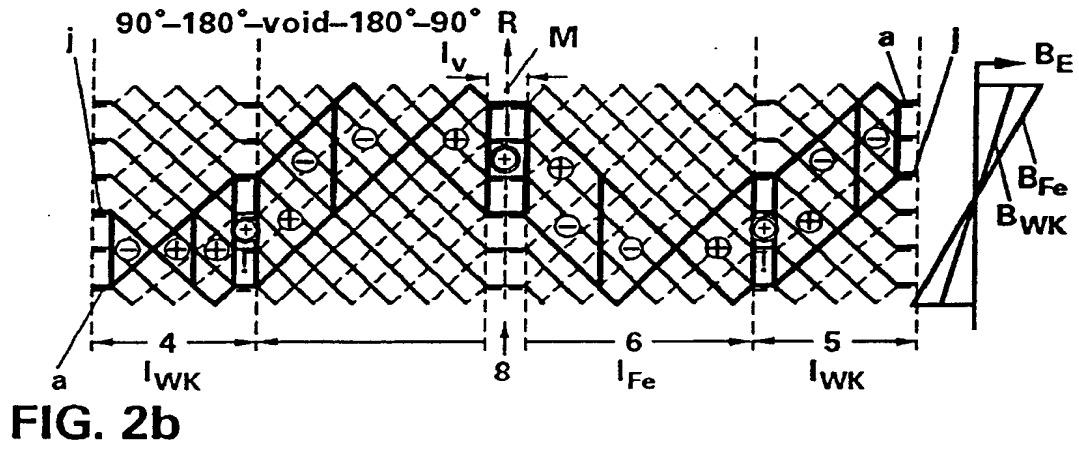
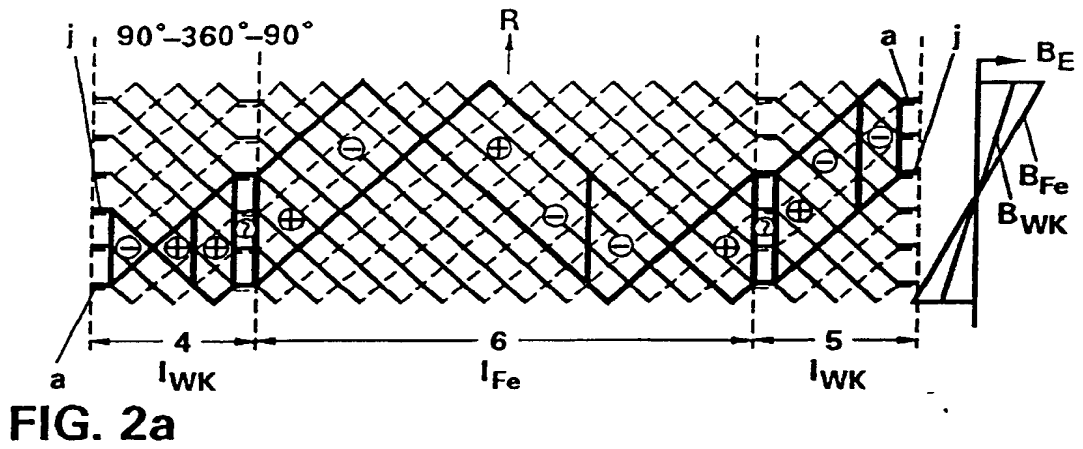
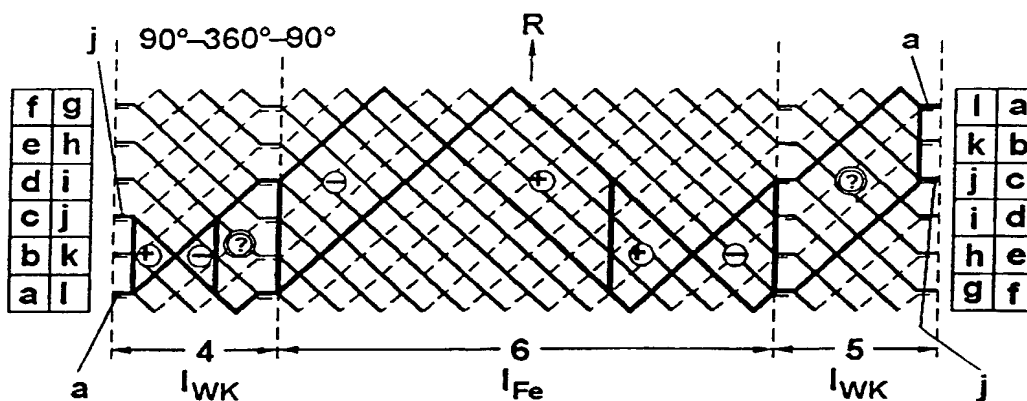
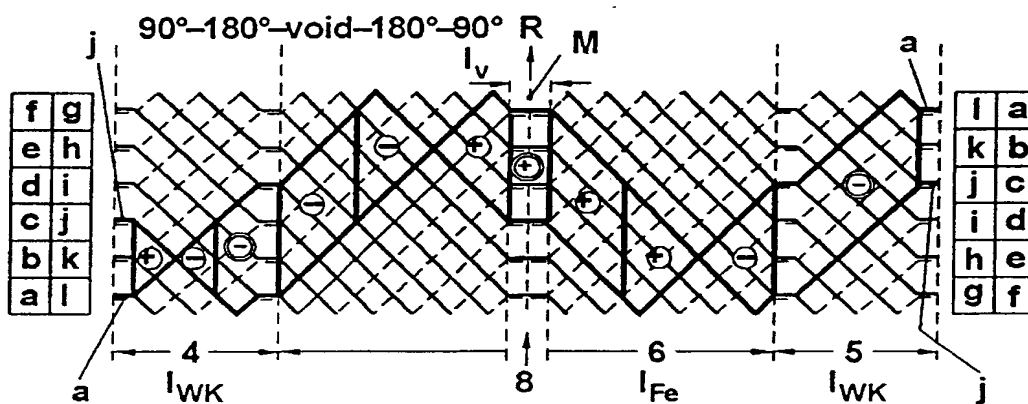


FIG. 4

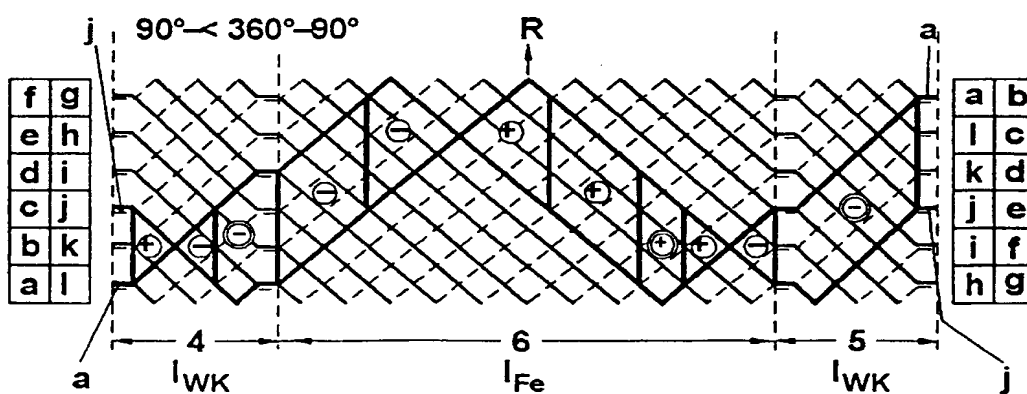




**FIG. 3a**



**FIG. 3b**



**FIG. 3c**





Europäisches  
Patentamt

# EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 96 81 0769

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
A	US 3 585 428 A (BENNINGTON BERNARD J ET AL) 15.Juni 1971 * Spalte 3, Zeile 63 - Spalte 4, Zeile 62; Abbildung 1 *	1	H02K3/14
A	TECHN.MITT. AEG-TELEFUNKEN, Bd. 63, 1973, BERLIN, Seiten 18-23, XP002029109 P. BAPAT: "Das Entstehen der Slingstromverluste in elektr. Masch. und Massnahmen zu ihrer Verringerung" tabelle 1 * Seite 21 *	1	
D,A	DE 14 88 769 A (ABB) 14.Mai 1969 Anspruch 1	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)
			H02K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchesort		Abschlußdatum der Recherche	
DEN HAAG		9.April 1997	
		Prüfer	
		Zoukas, E	
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 150 (11/94) (P4C03)